CHAPITRE I: Généralités

1 Introduction

On désigne d'une façon générale sous le nom de chemins de fer des voies munies de rails, sur lesquelles circulent des trains remorqués par des locomotives.

On aussi définir Le chemin de fer comme un service public crée pour la satisfaction des besoins du public et des structures industrielles. C'est un système de transport collectif guidé de personnes et de marchandises. Il constitue une alternative à la voiture, aux camions et à la congestion des portes des grandes agglomérations. Il permet des déplacements efficaces et reste en pratique le mode de transport terrestre dominant dans plusieurs pays.

Le chemin de fer englobe le métro, le tramway et la voie ferrée.

2 Généralité

2.1 Invention

Leur invention remonte au commencement de XIXème siècle mais déjà, avant cette époque, on avait utilisé la diminution de résistance au roulement qu'ornent les surfaces métalliques. On employa d'abord des rails plats munis d'un rebord, puis des rails en saillie, et la traction se firent soit au moyen de chevaux, soit au moyen de machines fixes.

C'est en 1811 que Georges Stephenson, ingénieur des houillères de Killingworth, construisit la première locomotive pour le service de ces mines mais c'est seulement en 1829 qu'à la suite d'un concours ouvert par les administrateurs du chemin de fer de Liverpool à Manchester, Stephenson produisit et fit adopter pour l'exploitation de cette ligne la fameuse Fusée et qui est la mère des locomotives actuelles. Elle pesait quatre tonnes, pouvait remorquer en palier une charge de 13 tonnes à la vitesse de 22 kilomètres et atteindre sans charge la vitesse de 45 km/h, qui était considérable pour cette époque.

2.2 Avantages

Il présente de nombreux avantages dont les principaux sont :

- Le contact métal sur métal limite a une faible valeur la résistance au roulement ce qui permet aussi la remorque des charges élevées avec une puissance et un personnel de bord souvent réduit à un homme . En contrepartie, ce contact métal sur métal augmente les distances de freinage.
- Le chemin de fer est un transport guidé qui n'offre aux véhicules qu'un seul degré de liberté en avant ou en arrière. Les changements de voie ne peuvent se faire qu'aux aiguillages, le dépassement est impossible. Ceci constitue une sécurité vis-à-vis des accidents.
- La circulation des wagons ne se fait pas isolément comme sur la route mais en convoi.
- Le débit d'une voie ferré est supérieur à celui d'une autoroute à 4 voies.
- Le coût moyen du kilomètre d'une voie ferrée à deux voies est moins cher que celui d'une autoroute à deux fois deux voies dans les mêmes conditions.
- Il présente un faible degré de pollution.
- A égalité de kilomètres transportés, le chemin de fer consomme deux à trois fois mois de carburant à la tonne transportée qu'un camion lourd.

2.3 Situation actuel en Algérie

Le réseau ferroviaire actuel et futur comporte trois ensembles de lignes

- **la rocade Nord** à voie normale (frontière Est/ Annaba/ Constantine/ Alger/ Oran/ Tlemcen / frontière Ouest) qui constitue l'artère principale des échanges entre les régions actuellement les plus développées du pays, **des lignes de rattachement**, également à voie normale, reliant la Rocade aux principaux ports et à diverses villes (Guelma, Skikda, Béjaia, Tizi-Ouzou, Mostaganem, Arzew, Ain-Temouchent, Ghazaouet, Jijel…),
- **la ligne minière Est** à voie normale Annaba/Djebel-Onk dont l'activité est essentiellement liée au transport vers la zone de Annaba des minerais de fer d'Ouenza – Bou-Khadra et des phosphates du Djebel – Onk .

- **des lignes de pénétration** en direction des Hauts-Plateaux et du Sud :
- El-Gourzi/Touggourt, à voie normale ; Blida/Djelfa ; Relizane/Tiaret et Mohammadia/Béchar, à voie étroite.

Il se compose de :

Un linéaire de voies principales en exploitation de : 4 266 Km

- 3 606Km de voie principale en Voie normale
- 660.Km en Voie Etroite
- Longueur de lignes électrifiées : 386, 3 KM
    - Banlieue d'Alger
    - Ligne Minière Est

2.4 LES INTERVENANTS INSTITUTIONNELS :

La maîtrise d'ouvrage des projets du secteur ferroviaire est assurée par **l'Agence nationale d'études et de réalisation des infrastructures ferroviaires** (ANESRIF). La gestion et l'exploitation de l'ensemble du réseau ferroviaire est confié, sous le régime de la concession, à **la Société nationale des transports ferroviaires** (SNTF).

3 Constitution d'une voies ferrées

La voie ferre est constitué par deux parties distingues (la superstructure et infrastructures)

L'infrastructure de la voie ferrée comporte en plus de l'ouvrage en terre les ouvrages d'arts, les galeries souterraines et les tranchés.

La superstructure est constitué par la plateforme, le sous ballast, le ballast, les traverses et les rails plus les accessoires d'attache et de fixation.

La voie ferrée· est soumise à des sollicitations statique et dynamique très importante et se trouve assez souvent dans des conditions climatiques et géologiques difficiles, elle est souvent exposé à l'action d'un ensemble de facteurs aussi destructif les uns que les autre tel que :humidité, le gel, l'eau, la neige etc.

Il résulte que les efforts continus doivent être déployés pour maintenir un état de fonctionnement des lignes de chemin de fer qui répond aux exigences techniques, ceci est l'essor de la maintenance.

3.1 Le rail

Le rail est une Poutre de répartition des charges de roues dans le Sens vertical, transversal et longitudinal et sert pour le guidage et maintien de la stabilité de l'essieu, le contact roue-rail acier / acier ayant les avantages de limiter la résistance à l'avancement par un surface réduite de contact et de faire le transfert des charges à la traverse via le système d'attaches.

Les rails sont caractérisés par

- leur profil
- la nuance d'acier qui les compose

Il existe différents profils et nuances de rail, adaptés aux utilisations auxquelles ils sont destinés

La majorité des profils laminés au début du chemin de fer n'ont eu qu'une durée éphémère ; seuls, en effet, le double champignon et le rail Vignole ont été largement utilisés. Il convient d'y ajouter un profil à gorge qui permet de poser les voies en chaussée en particulier dans les ports.

Tous ces profils possèdent en commun les éléments suivants : à la partie supérieure le champignon qui supporte les contacts des roues ; l'âme, partie médiane amincie ; le patin, partie inférieure ; les portées d'éclissage, parties inclinées du champignon et du patin qui permettent le serrage des éclisses. Le champignon du profil à gorge, comporte en outre, l'équivalent d'un contre-rail qui permet la circulation en chaussée des boudins de roues.

3.1.1 Rail DC (double champignon)

Le rail à double champignon est caractérisé par une forme symétrique avec champignon supérieur et champignon inférieur.

Dans l'idée de ses promoteurs, ce profil pouvait être réutilisé par retournement après usure du champignon supérieur. En fait, cette possibilité s'est révélée vaine du fait de l'encochage rapide du rail dans les coussinets qui le supportent. Par contre, ce profil, facile à laminer, était particulièrement intéressant à l'époque où le fer corroyé était le métal couramment utilisé pour la fabrication des rails.

Le rail à double champignon est fixé sur les traverses par l'intermédiaire de coussinets en fonte dans lesquels il est serré par des coins élastiques, en général métalliques, parfois en bois. La surface d'appui de ces coussinets sur les traverses peut atteindre 680 cm², ce qui a permis pendant longtemps aux réseaux utilisant des traverses en bois tendre de faire face à l'augmentation croissante des charges et des essieux. A l'heure actuelle, on n'utilise plus en pose neuve le rail à double champignon, les Chemins de Fer anglais, qui furent ses derniers partisans, l'ayant abandonné vers 1938.

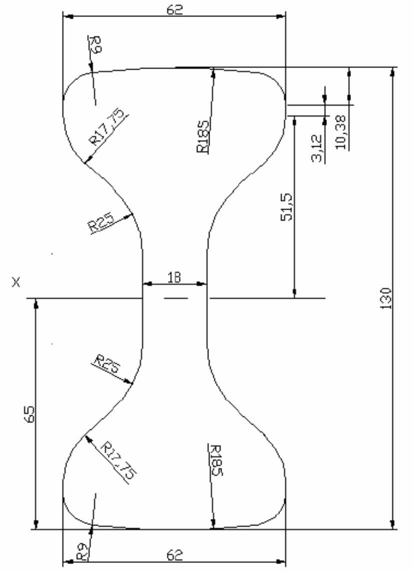


Figure 1:Ouest 38 kg/m symétrique

3.1.2 Rail a patin (Vignole)

Ce rail couramment désigné sous le nom de Vignole, se caractérise par une base élargie qui permet une fixation facile sur la traverse. Il évite les nombreux inconvénients du rail à double champignon : fixation dans des coussinets en fonte, encochage du champignon inférieur, difficulté de conservation du dressage. Il est fixé sur les traverses, soit directement, soit par l'intermédiaire de selles métalliques. Sa forme est largement conditionnée par la nécessité d'assemblage des rails entre eux, c'est-à-dire par le problème de l'éclissage, ce qui conduit souvent, dans les raccordements entre champignon et âme, à une forme contradictoire avec une bonne résistance du profil aux efforts.

C'est pourquoi la généralisation de l'emploi de rails soudés en grandes longueurs peut être de nature à permettre une modification assez sensible de la forme du rail, en évitant l'impératif posé par l'éclissage, un procédé de fortune permettant une réparation provisoire en cas de rupture.

Ce type est généralement utilisé pour le cas des trains de transport de marchandise et de transport de voyageur à longue distance ;

Le profil est compose de

Champignon→Courbure pour le contact roue-rail et masse pour fretter la zone de contact

Ame→Raccord avec portées d'éclissage

Patin→Largeur pour transfert de charge à la traverse, portée d'éclissage et zones pour les attaches

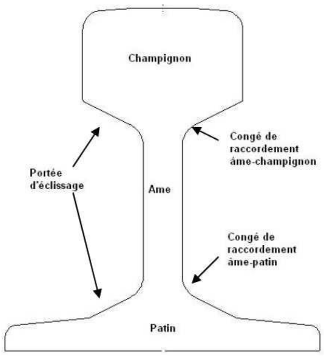


Figure 2: Nomenclature

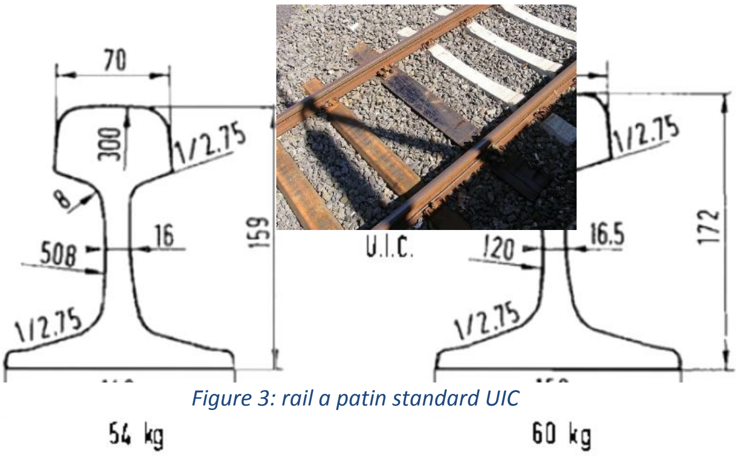
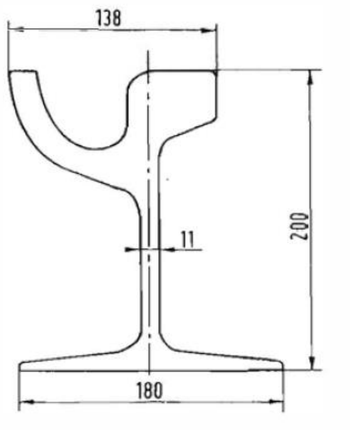


Figure 3: rail a patin standard UIC

Il y a multiples profils allant de 30 à 60 kg/m

La forme de type de rail Vignole est représenté dans la figure (Rail UIC 60, UIC : Union International Chemin de Fer), le poids par mètre linéaire de rail selon UIC 60 est de 60,3kglml, et selon UIC 54 et de 54,4 kg/ml. Ces rails ont généralement sont fournis en longueur de 18 m (acier de nuance 900A).

3.1.3 Rail à gorge (Tramway / voies de port)



Rail à Gorge : généralement utilisé pour le cas des tramways et les métros légers, leur poids propre est de l'environs de 58,96 kg/ml et leur géométrie est schématisée sur la figure ci-dessous.

3.1.4 Contraintes dans le rail

3.1.4.1 Contraintes de Hertz au contact rail/roue

- Déformation élastique au contact des courbures de la roue et du rail : ellipse de contact
- Ordre de grandeur numérique avec essieu de 22.5 t:
  - Rayons de contact : rail : 300 mm + roue de 920: 460 mm
  - Ellipse de contact : surface 134 mm² (demi-axes: 7.5/5.7 mm)
  - Contrainte au contact : 1256 MPa (12.56 kbar)
- Contrainte au-delà de la limite élastique au contact (écrouissage)
- Importance de contrôler la géométrie de contact
  - Conicité, profil d'usure des rails et des roues

3.1.4.2 Flexion du rail :

- Dépend de la charge de roue et de l'inertie du rail
- Mais aussi de la raideur de voie (travelage, étages élastiques et déformabilité de la plateforme)
- Ordre de grandeur : 60 à 100 MPa (0.6 à 1 kbar)

3.1.5 Ecartement des rails

Conformément au règlement UIC l'écartement normale des rails sera comme suit :

- En alignement 1435 mm, avec une erreur de +0 à +2 mm
- En courbe 80 <R < 150 m 1434,5 mm, avec une erreur de +0 à +2 mm
- En courbe R< 80 m 1430 mm, avec une erreur de +0 à +2 mmi

3.2 Traverse

Une traverse est un élément fondamental de la voie ferrée. C'est une pièce posée en travers de la voie, sous les rails, pour en maintenir l'écartement et l'inclinaison, et transmettre au ballast les charges des véhicules circulant sur les rails.

3.2.1 Fonction principale

- Répartir les charges verticales: Augmenter la surface d'appui sur le ballast
- Ancrer la voie transversalement: Contribuer à la stabilité du châssis de voie en charge (efforts des véhicules) ou à vide (stabilité LRS)
- Contribuer à la position géométrique des rails: écartement et inclinaison notamment
- Intégrer l'interface avec les systèmes d'attaches

3.2.2 Traverses en bois

3.2.2.1 Essences

- Bois indigène : principalement chêne mais aussi hêtre et pin
- Bois exotique : azobé

3.2.2.2 Fabrication

- Abattage, débardage et débitage en traverses blanches
- Dessiccation, frettage, entaillage et perçage
- Imprégnation de créosote (remplacée par l'utilisation d'essences de bois exotique)

3.2.2.3 Avantages

- Assure une bonne élasticité de la voie
- Bonne isolation électrique

3.2.2.4 Inconvénients

- Sensibilité aux agents atmosphériques (surtout pour le chêne)
- Résistance latérale peu élevée
- Coûts d'entretien devenant élevés
- Utilisation de créosote

3.2.2.5 Domaines d'emploi

- En pose neuve ou en régénération de la voie
  - zones courtes entre appareils de voie posés sur plancher bois,
  - zones où l'utilisation de traverses béton ne permet pas de dégager le gabarit sans travaux coûteux (tunnel, quais…),
- En maintenance, remplacement de traverses bois (nécessité de conserver un plancher homogène

3.2.3 Traverses métalliques

Profil laminé en forme de U renversé, embouti aux extrémités pour assurer la résistance latérale de la voie

Les traverses métalliques ne sont plus utilisées en France depuis une trentaine d'années

3.2.3.1 Avantages

- Imputrescible
- Peu d'entretien

3.2.3.2 Inconvénients

- Traverses légères
  - Difficile à maintenir sur les voies chargées
  - Résistance latérale faible malgré l'utilisation de bêches d'ancrage
- Corrosion
- Difficultés pour assurer l'isolement électrique entre les 2 files de rail

3.2.4 Traverses en béton

3.2.4.1 Conception des traverses

Capacité à supporter les moments de flexion générés par les charges de roue:

- moment de flexion positif sous rail qui correspond au moment appliqué au droit de l'axe du rail et qui génère une tension au niveau de la partie inférieure de la traverse.
- moment de flexion négatif au centre des traverses monobloc qui correspond au moment appliqué au centre de la traverse et qui génère une tension au niveau de la partie supérieure de la traverse

3.2.4.2 -+Avantages

- Longévité
- Résistance latérale de la voie importante

3.2.4.3 -+Inconvénients

- Fragilité aux chocs du béton
- Risque de corrosion des traverses bi-bloc au niveau des entretoises
- Risque d'attrition prématurée du ballast ⇒ épaisseur de ballast sous traverse plus importante qu'avec les traverses bois
- Tenue du nivellement plus délicate dans le cas de plateformes médiocres

3.2.4.4 Traverses bibloc

Formées de deux blocs de béton, les blochets, reliés par une entretoise métallique, qui absorbe les efforts en milieu de traverse. Il existe deux modèles de blochets :

La traverse à blochets de 68 cm, qui a pour dimensions :

- longueur = 2 245 m
- largeur = 29 cm (à la base des blochets)
- épaisseur = 17 ou 22 cm (dans l’axe de la table)

La traverse à blochets de 84 cm, qui a pour dimensions :

- longueur = 2 415 m
- largeur = 29 cm (à la base des blochets)
- épaisseur = 22 cm (dans l’axe de la table)

3.2.4.5 Traverses monobloc

En béton précontraint, amincies dans leur partie centrale, armées de fils à haute résistance.

- L’ancienne génération (modèles V.W, SCOP,…), fabriquée jusqu’en 1967, a les caractéristiques suivantes :
    - longueur = 2 30 m
    - largeur = 25 cm
    - épaisseur = 14 cm
- La nouvelle génération, fabrications à partir des années 1974 environ, présente les caractéristiques suivantes :
    - longueur = 2 50 m
    - largeur = 29 cm
    - épaisseur = 17 ou 20 cm

3.3 Systèmes de fixation :

- **Systèmes rigides**
    - Pas d'éléments élastiques
- **Systèmes élastiques**
    - Présence d'au moins un élément élastique (semelle et/ou attache)
    - Système de fixation directe, Le rail est fixé directement dans la traverse avec ou sans interposition de semelle ou de selle
    - Système de fixation indirecte ; Le rail est n'est pas fixé directement à la traverse ; interposition d'une selle

3.4 Attaches et semelles

- **Caractéristiques Mécaniques**
    - Assure un effort vertical de serrage du rail sur la traverse le plus constant possible
    - Couple de renversement important, s’opposant au déversement du rail
    - Transmission des efforts latéraux à la traverse
    - Contribuer à l’élasticité et à l’amortissement de la voie (attaches élastiques)
- **Assure l’isolement électrique**
- **Pose et entretien**
    - Mécanisation de la pose
    - Entretien réduit au minimum (consiste essentiellement à vérifier les qualités mécaniques de l’attache)

3.5 Types d’attaches

- **Fixation rigide**

- Crampons (utilisés aux USA)
- Tirefonds sur les traverses en bois
- Crapauds sur traverses métalliques

- **Fixation élastique directe**
  - Semelle en caoutchouc
  - Lame ressort :
    - griffon
    - attache Nabla
    - Fastclip
    - Vossloh
- **Fixation élastique indirecte**
  - Semelle en caoutchouc
  - Selle
  - Lame ressort (Attache Nabla, Fastclip, Vossloh)

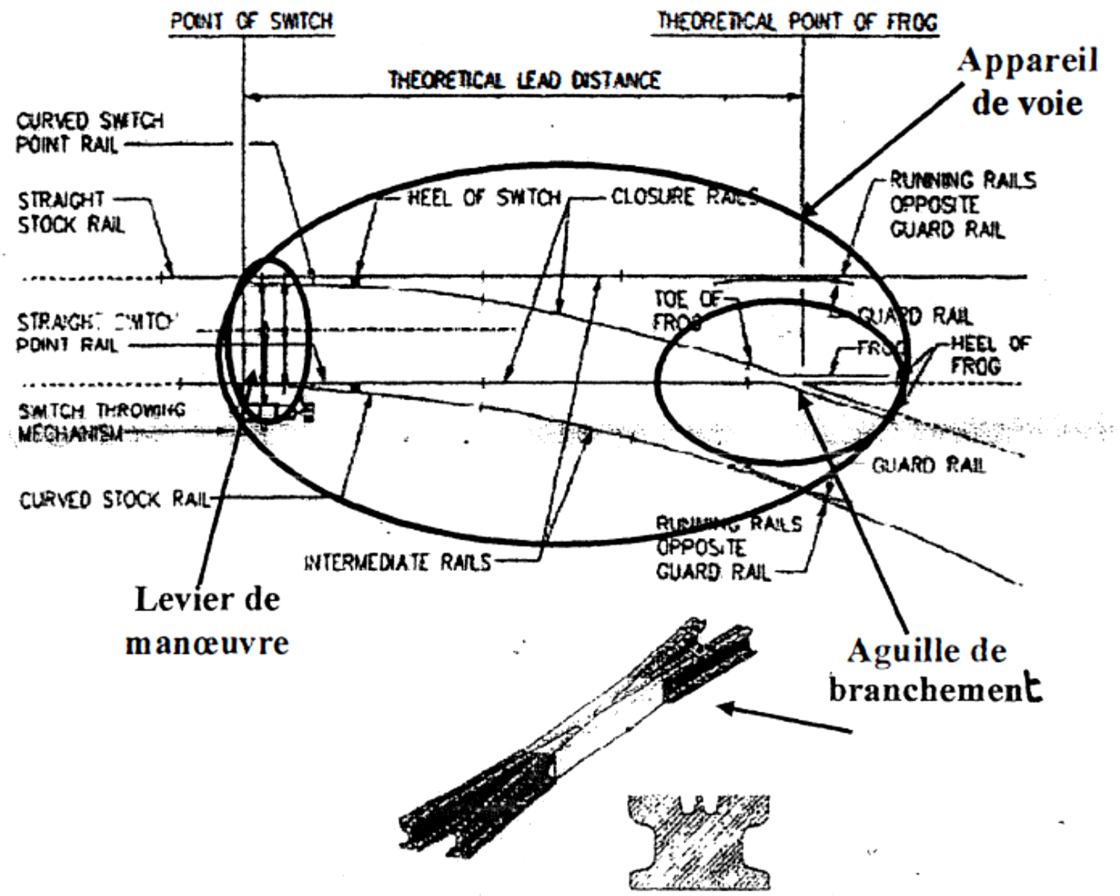
3.6 Appareil de voie

Les appareils de voie sont un moyen de franchissement ou de passage d'un train (de voyageur ou de marchandise) d'une voie principale à une voie service ou de franchissement d'une voie de croisement.

Généralement on utilise deux types d'appareils de voie selon l'UIC54 :

Appareil branche simple 1/9 : c'est-à-dire que la tangente de l'angle de l'appareil tga = 1/9, utilisé dans le cas d'un passage de voie principale a une voie de service ou de stationnement.

Appareil branche simple 1/12 : c'est-à-dire que la tangente de l'angle de l'appareil tga = 1/12 utilisé dans le cas d'un passage de voie principale a une autre voie principale et dans les entrée des gares ferroviaire.



CHAPITRE II.: Caractéristiques géométriques des voies

1. Géométrie du tracé

1.1 GENERALITES

Les paramètres de tracé de voie pour les tronçons de ligne à réaliser :

- Gamme de vitesse ≤ 220 km/h
- Trafic mixte voyageurs - marchandises
- Optimisation des conditions et des coûts de maintenance de la ligne à Grande Vitesse.

Les spécifications contenues dans le présent cours concernent les voies principales de la ligne nouvelle, conforme aux spécifications de la SNTF 2005

Les voies de raccordement aux lignes existantes, ainsi que les voies des autres installations non parcourues à grande vitesse, seront étudiées conformément aux normes françaises correspondantes. Cependant, certaines spécifications particulières les concernant sont édictées dans ce document.

1.2 VITESSES DE REFERENCE

La voie sera conçue pour accueillir un trafic mixte voyageurs et fret circulant aux vitesses projetées apparaissant ci-dessous:

	Voie Classique	En plaine	En zone montagneuse
Vitesse maximale admissible	120	220 km/h	200 km/h
Vitesse minimale à terme*	80	100 km/h	100 km/h

* à court terme certains trains « fret » seront limités à 80 km/h

1.3 CRITERE DE LIMITATION DES PARAMETRES DU TRACE

Parmi les paramètres définissant la géométrie du tracé, certains ont été limités afin de respecter les exigences de sécurité, de confort pour les voyageurs et de tenue de la voie.

Les valeurs limites suivantes ont été définies:

- Valeur limite normale: valeur à ne pas dépasser pour les circulations roulant aux vitesses maximales ou minimales admissibles.
- Valeur limite exceptionnelle: c'est une valeur plus défavorable que la valeur limite normale, qui peut être utilisée dans des circonstances exceptionnelles.

Les valeurs limites normales et exceptionnelles conditionneront la définition géométrique du tracé.

La marge exceptionnelle d'un paramètre est la différence qui existe entre les valeurs limites exceptionnelles et normales.

Si la valeur d'un quelconque paramètre dépasse la valeur limite normale, il faudra tenir

compte des considérations suivantes:

- Si un seul paramètre dépasse la valeur limite normale, sa valeur pourra atteindre la valeur limite exceptionnelle.
- Si plusieurs paramètres dépassent la valeur limite normale, il sera admis un dépassement maximum de 80 % de la marge exceptionnelle pour le paramètre le plus défavorable alors que les autres paramètres ne devront dépasser cette marge que de 20 %.
- Il est recommandé qu'un paramètre ne dépasse pas plus d'une fois la valeur limite normale sur un tronçon de 20 km de long.

1.4 TRACE EN PLAN

Le tracé en plan se composera de la succession judicieuse des éléments suivants : alignement droit, pleine courbe et courbe de transition.

Afin de permettre l'entretien ultérieur de la ligne, les éléments de tracé « pleine courbe » et « courbe de transition » seront matérialisés par des repères d'entrevoie placés, tous les 10 mètres, à 1 mètre du bord extérieur du rail de chaque voie et les ORP (origine du raccordement progressif) et FRP (fin du raccordement progressif) seront repérées.

La clothoïde sera utilisée comme courbe de transition.

Le plan de l'axe du tracé correspondra à l'axe de la voie dans le cas de voie unique, et à l'axe de la plate-forme dans le cas de voie double.

REGLES A RESPECTER DANS LA TRACE EN PLAN :

- L'adaptation du tracé en plan au terrain naturel afin d'éviter les terrassements importants.
- Eviter de passer sur des terrains agricoles et des zones forestières
- Eviter au maximum les propriétés privées
- Eviter le franchissement des oueds afin d'éviter le maximum d'ouvrages d'arts et cela pour des raisons économiques.
- Eviter les sites qui sont sujets à des problèmes géologiques.
- Essayer d'utiliser le maximum d'alignement,
- Eviter les terrains très plastiques

Les paramètres limites qui conditionnent le tracé sont repris ci-après:

1.4.1 Longueur minimum des éléments de tracé

Afin d'amortir suffisamment le roulis de la caisse des véhicules, des longueurs minimales ont été fixées pour les éléments de tracé. Les doucines (arrondis du diagramme des flèches centré sur une origine ou une fin de raccordement progressif) ont des longueurs normales comprises entre 30 et 40 mètres, exceptionnellement 20 mètres.

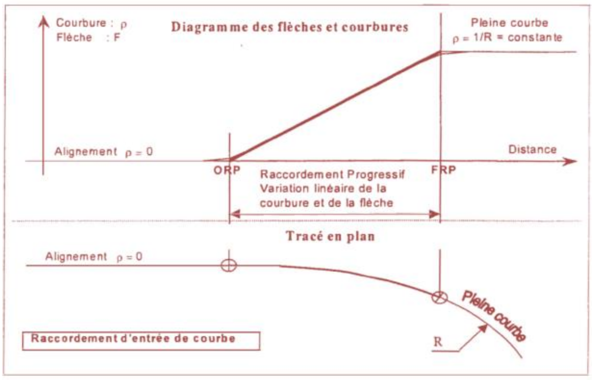
Les longueurs minimales des alignements et des pleines courbes, entre milieux de doucines, doivent respecter les valeurs exprimées en mètres ci-après (la vitesse V est exprimée en km/h) :

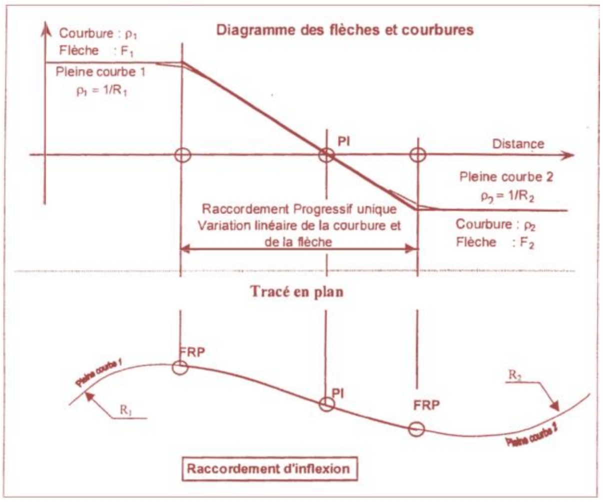
Valeur limite normale	V/2
Valeur limite exceptionnelle	V/3

La longueur minimale normale entre milieux de doucines est de 60 mètres, exceptionnellement

50 mètres. Cependant l'alignement entre 2 courbes proches de sens contraires peut être

inexistant. Dans ce cas, le raccordement entre 2 courbes se fait par un raccordement progressif (RP) d'inflexion.





1.4.2 Rayon minimum de l'alignement circulaire

La valeur du rayon minimum admissible est limitée pour assurer, en fonction des vitesses de circulation, ***le confort des voyageurs*** et ***éviter que les efforts transversaux*** sur la voie ne soient trop importants.

Le rayon minimum (normal et exceptionnel), sera défini à partir de l'insuffisance de dévers admissible pour les vitesses maximales et à partir de l'excès de dévers pour les vitesses minimales sans que le dévers maximum ne soit dépassé.

REMARQUES:

Le rayon minimum de la courbe devra être déterminé comme suit:

- Pour la vitesse minimale de circulation des trains (trains lents), l'excès de dévers (**E)** devra être inférieur à la valeur maximum admissible.
- Pour la vitesse maximale de circulation des trains (trains rapides), l'insuffisance de dévers (**I)** devra être inférieure à la valeur maximale admissible.

Donc le rayon minimum doit se traduire par l'équation suivante :

$$\frac{a}{g} \times \frac{V_{min}^2}{D_{max} - E} \geq R \geq \frac{a}{g} \times \frac{V_{max}^2}{D_{max} + I}$$

Dmax : Valeur maximale du dévers ;
a: l'écartement de la voie
g : l'accélération de la pesanteur.

La valeur minimale normale du rayon en voie principale est de 200 m. Dans des situations particulièrement contraignantes, le rayon limite exceptionnel peut être abaissé jusqu' à 150 rn moyennant l'adoption de dispositions particulières éventuelles (pose de contre-rail, graissage des rails, suivi particulier de la géométrie, . ..). Ces cas doivent faire l'objet d'études dans le cadre de l'instruction d'une demande de dérogation.

1.4.3 Contraintes du profil en long

Sauf cas exceptionnel, il ne doit pas y avoir d'interférences entre courbes de raccordement progressif en plan (clothoïde) et courbes de raccordement en profil en long définies dans l'article ci-après.

1.5 PROFIL EN LONG

Le profil en long de la voie est constitué de pentes uniformes reliées entre elles par des courbes circulaires.

Le profil longitudinal sera défini par la projection horizontale de la cote de ***la file basse des rails*** des voies sur un plan vertical passant par l'axe du tracé.

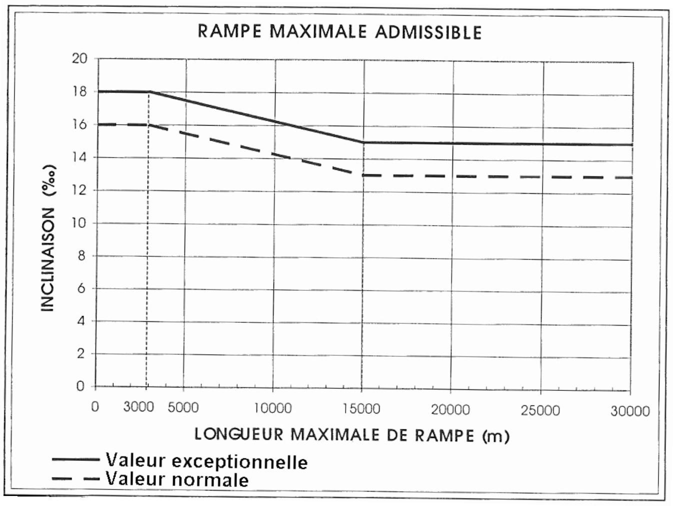
1.5.1 Déclivité maximale

La déclivité admise varie en fonction de sa longueur.

En principe, les valeurs admissibles à ne pas dépasser sont indiquées ci-après ; cependant dans le cadre d'une étude de variante, ces valeurs pourront être dépassées tout en respectant les dispositions reprises dans la dernière version de l'instruction SNCF/RFF IN 0272.

- En déclivité de longueur inférieure à 3000 m, elle ne doit pas dépasser 16‰ et exceptionnellement 18‰.
- En déclivité de longueur comprise entre 3 000 m et 15 000 m, elle diminue graduellement pour passer de 16‰ à 13‰, exceptionnellement de 18‰ à 15‰.
- En déclivité de longueur supérieure à 15 000 m, la déclivité ne doit pas dépasser 13‰ et exceptionnellement 15‰.

Le tableau ci-après précise la valeur de la déclivité en fonction de sa longueur d'application :



1.5.2 Rayon admissible en raccordements de profil en long

Les valeurs des rayons minima admissibles en profil en long sont limitées pour tenir compte des considérations suivantes :

a) lorsqu'un véhicule franchit à une vitesse « V » un raccordement de profil en long de rayon Rv, il est soumis à une accélération centrifuge :

$$a_v = \frac{V_{max}^2}{12{,}96 \times R_v} \leq a_{v\,rec}\ [m^2/S]$$

Cette accélération doit être limitée afin de ne pas perturber le confort des passagers. En conséquence, le rayon minimum adopté pour le profil en long sera également limité pour ne pas dépasser cette accélération à la vitesse maximale de circulation.

b) Les raccordements de profil en long sont définis par des raccordements circulaires, sans courbes de transition entre les pentes et le raccordement. Cela entraîne une accélération verticale brutale aux extrémités du raccordement,

qui provoque une oscillation de la suspension du véhicule et perturbe le confort des voyageurs.

Pour restreindre la variation brutale d'accélération verticale pour les circulations à vitesse maximale, on doit limiter le rayon minimum de ces courbes.

Il en résulte ci-dessous les limites des valeurs des rayons de raccordement en profil, exprimés en mètres, à respecter (la vitesse V est exprimée en km/h) :

Valeur normale	$0{,}35\ V^2$
Valeur exceptionnelle	$0{,}25\ V^2$
Points particuliers à des vitesses inférieures ou égales à 140 km/h	$0{,}15\ V^2$

1.5.3 Détermination de la longueur minimale des pentes uniformes et des raccordements en profil

Entre deux accélérations verticales brutales, un temps assez long doit s'écouler afin de permettre à la suspension d'amortir le choc et d'éviter les effets conjugués de plusieurs accélérations rapprochées, sources d'oscillations importantes du véhicule.

La valeur de la longueur minimale des déclivités constantes est donc limitée à :

Valeur minimale normale	V /2
Valeur minimale exceptionnelle	V / 2,5

La longueur minimale des raccordements de déclivité est de 30m pour tenir compte des bases de nivellement des bourreuses.

1.5.4 Autres contraintes du tracé en profil

Les zones de changement de phase d'alimentation électrique ainsi que les points de changement de voies avec voie d'évitement impliquent des contraintes de profil en long.

1.6 SECTION TRANSVERSALE

1.6.1 Ecartement de la voie

Il est fixé à **1,435 m** entre les 2 rails (écartement UIC).

1.6.2 Dévers..

Le dévers sera obtenu en surélevant le rail extérieur par rapport au rail intérieur. La variation du dévers à l'entrée et à la sortie d'une courbe sera continue tout au long de la courbe de transition.

Dévers théorique (d_v)

Formule pratique $d_v = 11.8\ V^2 / R$ [d en mm, V en km/h, R en m]

Dévers prescrit (d_p)

Le choix du dévers à mettre en voie est un compromis, car il doit permettre la circulation, dans des conditions normales de sécurité et de confort, aussi bien des trains rapides de voyageurs que des trains lents de fret.

Ce dévers donné à la voie est appelé dévers prescrit, est en général compris entre 0.4 d_v et

0.6 d_v

$$d = 11.8\frac{V^2}{R} - I$$

Dévers maximum admissible D_{max}:

Le dévers maximum est limité afin de ne pas perturber le confort des voyageurs et d'éviter le déplacement de marchandises ***lors de l'arrêt impromptu du train*** fret dans une courbe.

Valeur maximale normale du dévers D_{max} = 160mm

Valeur maximale exceptionnelle du dévers D_{max} = 180mm

Insuffisance de dévers maximale admissible I:

On limite l'accélération non compensée, afin d'assurer la sécurité des circulations, le confort des voyageurs et un coût raisonnable de l'entretien de la voie.

L'insuffisance de dévers se définit à partir de l'accélération non compensée par la formule suivante:

$$\alpha_{nc} = \frac{g \times I}{a} \rightarrow I = \frac{\alpha_{nc} \times a}{g}$$

« a » étant l'écartement de la voie
« g » l'accélération de la pesanteur.
Les valeurs maximales admissibles sont:

	Voie Classique	Voie Rapide
Valeur maximale normale	110 mm	150mm
Valeur maximale exceptionnelle	130mm	160mm

Excès de dévers maximal admissible E:

L'excès de dévers est limité pour éviter l'usure prématurée du rail intérieur dans les courbes. Les valeurs maximales admissibles sont les suivantes :

Valeur maximale normale	110mm
Valeur maximale exceptionnelle	130mm

1.7 INTERACTION ENTRE TRACE EN PLAN ET SECTION TRANSVERSALE

1.7.1 Limite de la variation de dévers dans les courbes de transition

Du fait de la variation du dévers dans les courbes de transition, les deux rails forment un «**gauche**» qui nuit à la stabilité des véhicules. Dont ***le Vitesse de montée ou de descente d'un rail par rapport à l'autre pour un véhicule : 50 mm/s (maxi 60 mm/s)***

Afin d'éviter que les surcharges et les délestages puissent déstabiliser les circulations et les faire dérailler, la longueur des courbes de transition sera fonction du dévers adopté et du taux de variation de dévers admissible, selon la relation suivante :

$$\frac{\Delta d}{\Delta I} = R_p$$

R_p étant le taux de variation dévers maximal admissible en mm/m, dérivé des valeurs retenues au point 1.7.2 ci-après.

Limites de ce taux exprimé en mm (la vitesse est exprimée en km/h):

Valeur maximale normale	180/V
Valeur maximale exceptionnelle	216/V

1.7.2 Limite la variation d'insuffisance de dévers

Variation d'accélération transversale "jerk" limitée à 0.5 m/s3

Les valeurs maximales sont indiquées ci-dessous :

Valeur maximale normale	75 mm/s
Valeur maximale exceptionnelle	90 mm/s

2 ENTRAXES ET GABARITS

2.1 GABARITS DE CIRCULATION

Les gabarits à prendre en compte se déterminent à partir des contours de référence «GC».

2.2 GABARIT D'IMPLANTATION DES OBSTACLES

L'ensemble des obstacles : structures, équipements pour la fourniture d'énergie, pour la signalisation, etc., respecteront les prescriptions tenant compte :

- Des contours cinématiques de référence définis ci-avant.
- Du tracé et de la vitesse de circulation sur la voie contiguë.
- De la nature et de la longueur de l'obstacle (continu, discontinu ...).
- Du type de matériel roulant.
- Des marges et des besoins de la maintenance.
- De la sécurité du personnel d'après les règlements en vigueur et les prescriptions adoptées.

2.2.1 Gabarits latéraux minimum

Ils seront étudiés sur la base d'une piste de 70 cm de largeur au minimum pour le personnel.

2.2.2 Dispositions relatives à la sécurité du personnel

Des dispositions complémentaires permettant la sécurité du personnel seront envisagées en fonction des dimensions des gabarits latéraux et des obstacles à implanter.

2.2.3 Hauteur libre des ponts - routes

La hauteur minimale a été fixée à 6,35 m, sauf cas particuliers qui feront l'objet d'études spécifiques telles que :

- Les appareils de voie implantés à proximité des ponts - route
- Les conditions particulières de l'environnement

Cette distance sera mesurée dans l'axe de la voie à partir du niveau du plan de roulement de la voie considérée et dans les conditions les plus défavorables. Cette valeur ne prend pas en compte la marge pour la maintenance (0,05 m) ni la tolérance concernant la réalisation des structures (0,05 m).

2.2.4 Quais de voyageurs

La construction de quais de voyageurs n'est pas prévue sur le parcours des voies à Grande Vitesse.

Les cas des points de changement de voie avec évitement avec quais de service sont traités dans les documents infrastructures.

2.2.5 Entrevoies

L'entraxe pour la voie double principale est de **4,20 m**.

Dans les raccordements de la ligne nouvelle avec la ligne classique, on adoptera un entraxe de 3,67m dès lors que celui-ci sera parcouru à une vitesse inférieure à 160 km/h.

Double voie à Grande Vitesse/voie d'évitement :

- Quelle que soit la vitesse sur la voie principale, l'entraxe minimum entre la voie d'évitement et la voie principale la plus proche sera de 6,50 m.
- Cette valeur permettra l'implantation d'une piste ou de poteaux caténaires. Elle est à majorer en fonction de la taille des obstacles et de l'existence simultanée de poteaux caténaires et de pistes.

3 SECTION TYPE DE LA PLATE FORME

Les dispositions qui devront s'appliquer sont détaillées dans le chapitre «Infrastructure ». Les spécifications communes applicables à l'ensemble du projet sont données ci-après :

La largeur de la plateforme en double voie dont l'entraxe mesurera 4,20 m (sans obstacles dans l'entrevoie) sera fixée à 13,60 m.

En voie unique, cette largeur de plateforme sera fixée à 8 m.

Une zone sera réservée à l'implantation d'équipements de signalisation, de télécommunications, etc.

Sur les voies à l'air libre, un passage permettant la circulation du personnel a été prévu latéralement pour chaque côté en double voies et d'un seul côté pour les plateformes de voie unique.

L'axe des poteaux caténaires sera situé au minimum à 3,25 m de l'axe de la voie.

REMARQUE :

Les dispositions de type « protection du personnel» peuvent influer sur la position de la piste pour le personnel par rapport aux voies (ici intervient la notion de "zone dangereuse"). Ces dispositions seront liées aux critères de maintenance proposés.

Le schéma de la plateforme type à double voie est donné ci-après:

3.1 SCHEMA EN COUPE DE LA PLATE FORME TYPE

Plate-forme à double voie en double pente :

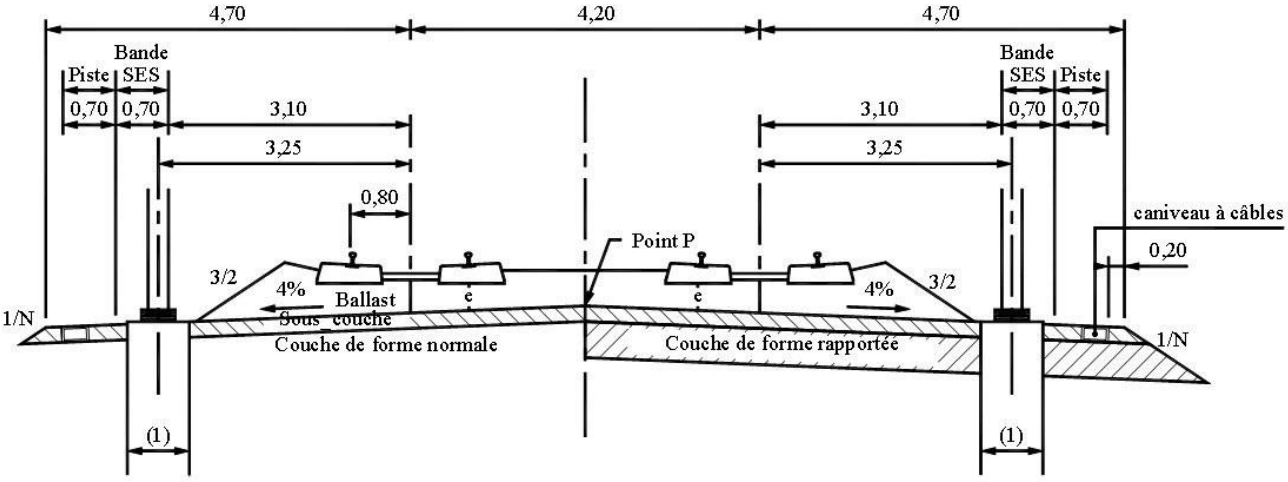


Plate-forme à double voie en pente unique :

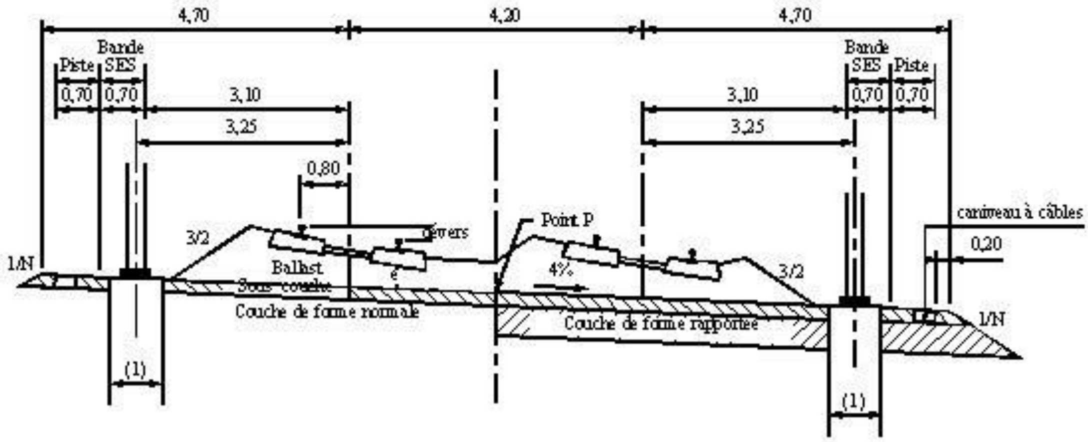
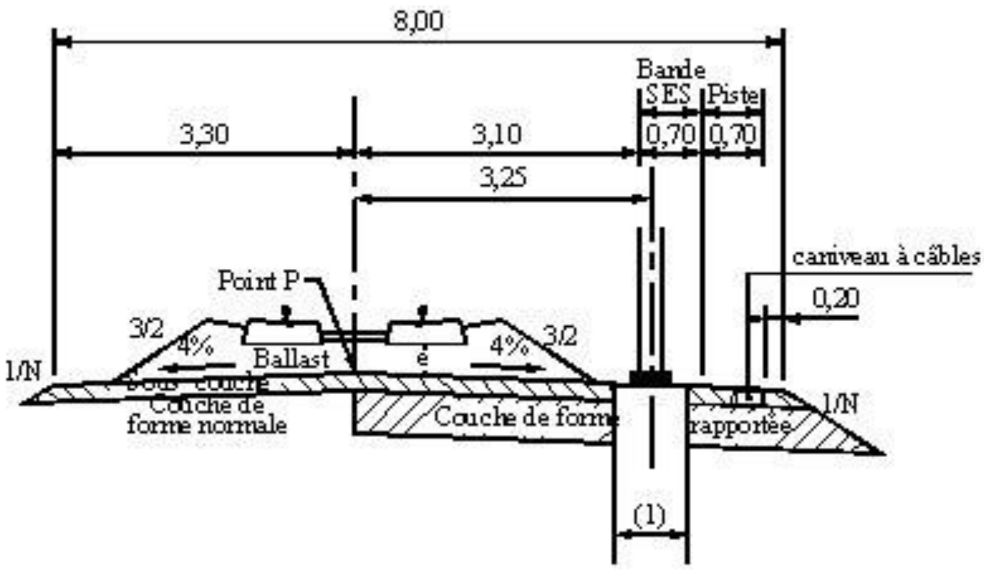


Plate-forme à voie unique en double pente :



Les épaisseurs de ballast sont indiquées ci-dessous :

Épaisseur normale	0,30m
Cas des viaducs et tunnels	0,35m

Les dispositions prises en compte pour les études sont les suivantes :

- Référence en altitude de la plateforme: point P. Le point P étant le niveau supérieur de la sous-couche située sous le ballast considéré dans l'axe de la plateforme future. Ce point P correspond à l'axe de la voie dans le cas de la voie unique et à l'axe de l'entrevoie dans le cas de la voie double.
- Le calage du point P par rapport aux rails sera déterminé à partir de la hauteur de ballast, mesurée entre la partie inférieure de la traverse et la plateforme, à la verticale du rail dans les conditions les plus défavorables permettant d'obtenir l'épaisseur de ballast souhaitée.

Il faudra tenir compte du fait que le profil longitudinal défini par le point P sera influencé par les variations de la pente transversale de la plateforme.

Il y aura lieu de vérifier le profil en long des rails qui reste la référence incontournable dans l'étude de tracé après la définition du profil longitudinal de la plateforme (donnée par le point P).

L'épaisseur du ballast donnée ci-avant prendra en compte les tolérances concernant la mise en place du ballast et la réalisation de la plateforme.

4 APPAREILS DE VOIE

4.1 6.4.1 - TYPOLOGIE DES APPAREILS DE VOIE

La typologie des appareils de voie sera déterminée en fonction des spécifications mentionnées dans le cahier des charges et des vitesses de circulation retenues dans le schéma des installations, ainsi que suivant la pré-norme CEN 256132.

Ces appareils devront permettre des vitesses de franchissement en voie déviées comprises entre 60 et 220 km/h

4.2 CONDITIONS D'IMPLANTATION

4.2.1 Conditions générales

Les appareils de voie seront implantés en déclivité constante. Il en sera de même des communications.

Les appareils de voie seront implantés en alignement mais pourront exceptionnellement être posés en courbe dans les zones particulièrement difficiles notamment dans zones de raccordement entre la ligne nouvelle et la ligne existante..

D'autre part, dans les zones situées à proximité d'un ouvrage d'art, les appareils de voie devront être situés à des distances minimales qui sont fonction de la longueur L de celui-ci:

Distances minimales	Longueur de l’appareil
≥ 20m	L ≤ 30 m
≥ 50 m	30 m < L ≤ 90 m

≥ 50 m	L> 90 m depuis le côté opposé à l'appareil de dilatation

Si la longueur L rend obligatoire l'installation d'un appareil de dilatation, l'appareil de voie devra être implanté à une distance minimale de 100 m de l'extrémité de celui-ci.

4.2.2 Règles d'implantation

En tracé en plan

L'implantation des appareils de voie s'effectuera conformément aux longueurs minimales du tracé retenues ci-dessous :

En pointe :

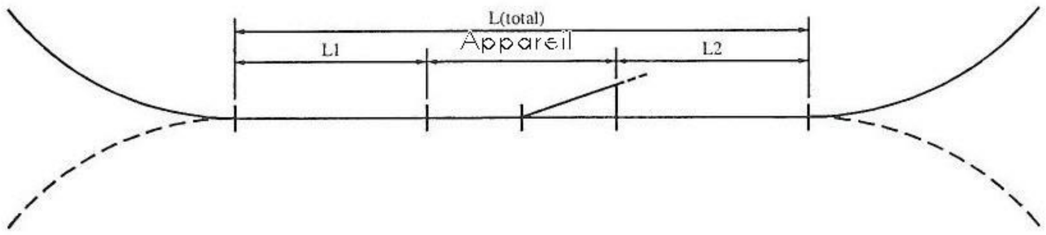
La longueur minimale d'alignement (L1) devra être égale à Vd/2, Vd étant la vitesse exprimée en km/h de franchissement en voie déviée.

En talon de la branche déviée :

- Si la sortie d'appareil est en alignement, la longueur minimale d'alignement à respecter devra être égale à $V_d/2$.
- Si la sortie d'appareil est en courbe,
- V_d < 100: il conviendra de réserver un alignement de longueur minimale égale à V_d /2 ou de prolonger la courbe de l'appareil suivie elle-même d'un raccordement progressif.
- 100 ≤ V_d < 160 : il est conseillé de prolonger la courbe de la voie déviée par un raccordement progressif dans le même sens et ce pour toute situation nouvelle.
- V_d ≥ 160 : la condition ci-dessus est obligatoire. Quelle que soit V_d, la longueur des raccordements sera calculée afin d'obtenir une variation maximale d'insuffisance de dévers $\Delta I/\Delta t$ de 75 mm/s (valeur normale) et 90 mm/s (valeur exceptionnelle).

En talon de la voie directe :

La longueur minimale d'alignement L_2, à réserver, doit être supérieure à 50m.



Dans le cas de deux appareils disposés pointe à pointe, la valeur minimale pour « L » doit tenir compte :

- des contraintes du tracé: « L » ≥$V_d/2$ (V_d étant la vitesse en voie déviée de l'appareil le moins performant),
- des contraintes de signalisation et de caténaire, qui sont fonction des éléments et systèmes définis pour ces domaines.

Profil en long

En profil en long, les appareils de voie ne doivent pas se situer à moins de 100 m d'un raccordement ou d'un point de changement de déclivité.

5 APPAREILS DE DILATATION

Sur les lignes à Grande Vitesse, les appareils de dilatation sont destinés à des ouvrages d'art très longs. Ils ne sont nécessaires que sur des tabliers d'un certain type et d'une certaine longueur. Il est nécessaire de mener une étude spécifique sur ces tabliers en se basant sur les critères du cahier de prescriptions (type, longueur, disposition des tabliers).

5.1 REGLES D'IMPLANTATION

Dans la mesure du possible, les appareils de dilatation devront être implantés en alignement et en déclivité de valeur constante.

Les appareils de dilatation seront distants les uns des autres de 300 m au minimum.

Les appareils de dilatation ne devront pas être positionnés sur un raccordement progressif ni leurs extrémités à moins de 100 m d'une extrémité de raccordement en plan ou d'un point de changement de déclivité.

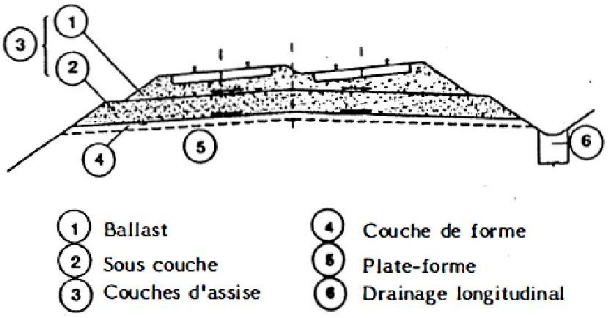
- Leur extrémité la plus proche sera située au minimum à 100 m des appareils de voie.
- Les appareils de dilatation ne devront jamais être situés en double courbure (en plan et en profil).
- Dans les zones où seront implantés les appareils de dilatation, le rayon en plan ne devra pas être inférieur à 3000 m et le profil en long ne devra pas comporter de courbe circulaire de raccordement de rayon inférieur à 16 000 m.

CHAPITRE III : Dimensionnement des structures d'assise

1 Généralité

Par définition, La couche d'assise comprend la couche de ballast et la sous-couche (sous ballast). Leurs rôles principaux sont :

- L'amortissement des vibrations importantes provenant de contacte Rails - Roue
- La répartition des charges provenant des traversés d'une manière presque uniforme sur la plateforme ;
- La contribution à la stabilité longitudinale et transversale de la voie ferrée ;
- L'évacuation des eaux de ruissellement par le drainage



2 Couche de Ballast :

Le ballast est un granulat utilisé dans la construction de voies ferrées et dont 100 % de la surface des grains est entièrement concassée

2.1 Rôle

- La transmission des efforts engendrés par le passage des trains au sol, sans que celui-ci ne se déforme par tassement.
- Le rôle du ballast est aussi d'enchâsser les traverses afin d'assurer une résistance aux déformations longitudinales, particulièrement importante pour la technique des longs rails soudés.
- Assure en raison de sa granularité particulière le drainage et l'évacuation des eaux superficielle ;
- Jeux le rôle d'un amortisseur de vibration très efficace grâce à sa propriété rhéologique (dissipation de l'énergie de vibration par attrition (contact des éléments) ;

2.2 Matériau

On utilise généralement de la pierre concassée, de granulométrie variant entre 31,5 mm et 50 mm, de type plutonique[1] : granite, diorite, etc. On utilise du gravillon fin (10 mm à 35 mm) pour le nivellement. Les carrières où l'on extrait et transforme ces matériaux sont les ballastières. Il est aussi possible d'utiliser le laitier (produit par les hauts-fourneaux).

Les éléments du ballast doivent s'imbriquer, de façon à former une masse compacte, mais perméable.

La qualité de ballast est exprimée à partir des essais classiques :

- Essai de la résistance à l'usure (essai Deval ou micro-Deval) ;
- Essai de la résistance à la fragmentation (essai de Los Angles)

[1] Les **roches plutoniques** (ou intrusives) se forment lors du refroidissement d'un magma en profondeur

- Essai de la résistance à la compression

Reference normative :***NF EN 13450*** Granulats pour ballasts de voies ferrées

Le ballast utilisé en chemins de fer doit avoir au moins les qualités suivantes :

- La résistance à la compression simple Rc≥ 1400 kg/cm2
- Coefficient Micro Deval $M_{DE} \leq 15$
- Coefficient Los Angles sec LA ≤ 24
- La catégorie A du tableau 1 de la norme EN 13450 est exigée (ballast 3 1 .5/50)[2].

Catégories	Ballast (d/D)	Granularité Pourcentage en masse de passant							
NF EN 13450		80	63	50	40	31,5	22.4*	31,5 à 50	31,5 à 63
A	31,5/50	100	100	70 à 99	30 à 65	1 à 25	0 à 3	≥ 50	-

* Il est permis d'utiliser un tamis de 25 mm au lieu du tamis de 22.4 mm avec une tolérance de 0 à 5.

2.3 Contrainte

Le ballast subit deux types d'usure :

- contamination par des matériaux parasites, par exemple de la terre. On procède à des désherbages, mais il est nécessaire de remplacer le ballast régulièrement ;
- tassement du ballast sous les traverses, ce qui provoque une déformation verticale de la voie. Il est alors nécessaire de réinjecter du ballast de faible granulométrie sous les traverses; ou bien de réaliser une opération d'entretien à l'aide d'une bourreuse.

3 Sous-couche :

La sous-couche est une couche d’adaptation interposée entre la couche de ballast et la plateforme, La sous-couche peut être mono ou multicouche.

Elle comprend du haut vers le bas, une couche "sous ballast" en grave propre bien gradué (0/31.5) puis une couche de fondation dans le cas de mauvais sol et enfin, s’il y a lieu une couche anti-contaminatrice complété par des feuilles de géotextile ou géo-membrane

3.1 Rôle de la sous-couche

Elle a des rôles multiples :

- Amélioration de la portance et meilleure répartition des charges transmises,
- Contribution à l’amélioration des propriétés vibratoires,
- Anticontamination entre la plateforme et la couche de ballast,
- Protection contre l’érosion et le gel,
- Evacuation des eaux de pluies.

[2] Ballasts neufs pour voies ferrées, CT IGEU 001, SNCF ,2006

3.2 Exigence technique

L'épaisseur et la nature de la sous -couche d'assise dépendent :

- Des caractéristiques intrinsèques des sols de la plateforme ;
- Des conditions climatiques du site;
- Des caractéristiques hydrogéologique et hydraulique de site ;

L'épaisseur de la couche de ballast doit être prise en compte lorsque l'on dimensionne la sous-couche.

4 Plateforme

4.1 Définition

Partie supérieure de l'ouvrage en terre supportant la sous-couche. La plateforme est constituée de terres rapportées dans le cas d'un remblai ou du sol en place dans le cas d'un déblai.

Pour évaluer la qualité de la plateforme, il convient :

- D'apprécier la qualité de chaque sol composant la plateforme,
- D'apprécier la qualité de la plateforme complète : couche de forme + sol sous-jacent.

4.2 Classification des sols pour la plateforme

La qualité d'un sol dépend des deux paramètres ci-après :

- La nature géotechnique du sol ; à cet égard, on utilise l'identification géotechnique.
- Les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales ; ces conditions, sont réputées bonnes si :
  - La couche supérieure du sol considéré est hors de toute nappe naturelle (niveau de cette dernière mesuré avant toute opération de rabattement complémentaire et en période climatique défavorable).
  - La plateforme n'est pas le siège de percolations (pénétration par l'eau circulant dans le sol (éventuellement pollué)) naturelles transversales, longitudinales ou verticales nocives,
  - Les eaux de pluie sont évacuées correctement de la plateforme et les dispositifs longitudinaux de drainage sont en bon état de fonctionnement.

Si l'une au moins de ces trois conditions n'est pas remplie, les conditions hydrogéologiques et hydrologiques sont réputées mauvaises.

On distingue, selon que les conditions ci-dessus soient bonnes ou mauvaises et selon les modalités de tableau, les quatre classes de ***qualité*** Q_{Si} ***de sols*** ci-après:

- Q_{S0} : **Sols "impropres"** à la réalisation d'une plateforme correcte et nécessitant certaines mesures confortatives, (remplacement du matériau sur une certaine épaisseur, traitement aux liants, utilisation de géotextiles, renforcement par pieux, etc.)
- Q_{S1} : **Sols médiocres** acceptables tels quels, dont on doit toujours se préoccuper du bon drainage. Ces sols peuvent, éventuellement, être transformés en sols de meilleure qualité par un traitement approprié, (traitement aux liants).
- Q_{S2} : **Sols moyens.**
- Q_{S3} : **Bons sols**.

CLASSIFICATION DE LA QUALITE DES SOLS[3]

Classification des sols (Identification géotechnique)	Classe de qualité des sols
0.1 Sols organiques 0.2 Sols fins (comportant plus de 15 % de fines) foisonnés, humides et donc non compactables 0.3 Sols thixotropes (quick-clay par exemple) 0.4 Sols comportant des matériaux solubles (sel gemme ou gypse) 0.5 Sols comportant des matériaux polluants (déchets industriels, par exemple) 0.6 Sols mixtes "minéraux organiques"	QS0 *Sols impropres*
1.1 Sols comportant plus de 40 % de fines (sauf sols 0.2) 1.2 Roches très évolutives Par exemple : - Craies de $\rho_d < 1{,}7$ t/m^3 et de friabilité forte - Marnes - Schistes altérés 1.3 Sols comportant de 15 à 40 % de fines (sauf sols 0.2) 1.4 Roches évolutives Par exemple : - Craies de $\rho_d < 1{,}7$ t/m^3 et de friabilité faible - Schistes non altérés 1.5 Roches tendres Par exemple : Si microdeval en présence d'eau (MDE) > 40 et Los Angeles (LA) > 40	QS1 Sols médiocres
2.1 Sols comportant de 5 à 15 % de fines 2.2 Sols comportant moins de 5 % de fines mais uniformes ($C_U \leq 6$) 2.3 Roches moyennement dures Par exemple : Si 25 < MDE ≤ 40 et 30 < LA ≤ 40	QS2 Sols moyens
3.1 Sols comportant moins de 5 % de fines 3.2 Roches dures Par exemple : Si MDE ≤ 25 et LA ≤ 30	QS3 Bons sols

[3] Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires, UIC, 2e édition, 01 .01.94

4.3 Classification des plateformes

La portance d'une plateforme dépend de la:

- qualité du sol constituant le corps de remblai ou du sol en place en fond de déblai.
- qualité et de l'épaisseur de la couche de forme (lorsque cette dernière existe).

On peut distinguer, en fonction des paramètres ci-dessus les trois classes suivantes de plateformes en fonction de la qualité de leur portance :

- **P_1** : Plateforme médiocre.
- **P_2** : Plateforme moyenne.
- **P_3** : Plateforme bonne.

Les méthodes pour effectuer ce classement sont diverses. Une de ces méthodes est donnée ci-après[4]:

Spécifications pour le cœur du remblai ou esplanade naturelle de déblai		Capacité de support nécessaire pour la plateforme	Spécifications pour la couche de forme		
Qualité du matériel	CBR_{min}(a)		Qualité du matériel posé	CBR_{min}(b)	Epaisseur minimale (m)
QS1	2-3	P1	QS1	2-3	--
		P2	QS2	5	0,50
		P2	QS3	10-17	0,35
		P3	QS3	10-17	0,50
QS2	5	P2	QS2	5	--
		P3	QS3	10-17	0,35
QS3	10-17	P3	QS3	10-17	--

(a) Le CBR sur échantillon inaltéré lorsqu'il s'agit du terrain naturel, et sur échantillon remoulé et compacté quand il s'agit du cœur du remblai (les échantillons doivent être saturé durant l'essai).

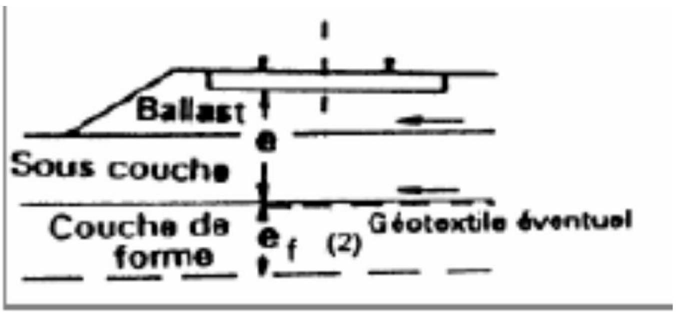
(b) Le CBR sur échantillon remoulé et compacté (les échantillons doivent être saturés durant l'essai)

5 Épaisseur minimum des couches d'assise

5.1 Détermination de l'épaisseur minimum

La formule de calcul[5] de l'épaisseur minimal de la couche d'assise est donnée comme suit

E = E+a+b+c+d+f+g



E : paramètre qui dépend de la qualité de portance de la plate-forme

a, b, c, d, f et g sont des paramètres qui dépend de la classe de voie, de l'armement (type de rails), de l'intensité du trafic de la voie et de vitesse du train ils sont données comme suit :

[4] Dimensionnement des structures d'assise pour la construction et la réfection des voies ferrées, EF2C20N03, SNCF, 1996

[5] Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires, UIC, 2e édition, 01 .01.94

E	= 0,70 m	pour les plates-formes de classe de portance P_1
E	= 0,55 m	pour les plates-formes de classe de portance P_2
E	= 0,45 m	pour les plates-formes de classe de portance P_3
a	=0	pour les groupes UIC 1 et 2 (ou lignes à V ≥ 160 km/h quel que soit le groupe UIC)
a	= - 0,05 m	pour les groupes UIC 3 et 4
a	= - 0,10 m	pour les groupes UIC 5, 6 et 7, 8, 9 avec voyageurs
a	= - 0,15 m	pour les groupes UIC 7, 8, 9 sans voyageur'
b	= 0	pour les traverses bois de longueur 2,60 rn
b	= (2,50 – L)/2	pour les traverses béton de longueur L (b en m. L en m, b peut être négatif si L > 2,50 m)
c	=0	pour un dimensionnement normal
c	=-010 m	à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC "7, 8, 9 sans voyageur
c	=-0 05 m '	à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC autre que"7, 8, 9 sans voyageur"
d	=0	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 200 kN
d	= + 0,05 m	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 225 kN
d	=+0,12 m	lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 250 kN
f	=0	pour toutes les lignes à V ≤ 1 60 km/h et pour les plates-formes de portance P_3, des lignes à grande vitesse.
f	=+ 0,05 m	pour les plates-formes de classe de portance P_2 des lignes à grande vitesse.
f	=+ 0, 1 0 m	pour les plates-formes de classe de portance P_1 des lignes à grande vitesse
g	=+ géotextile	lorsque la couche de forme est en sol QS_1 ou QS_2
g	= 0 (pas de géotextile)	lorsque la couche de forme est en sol QS_3

5.2 Classification des lignes d'UIC

L'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) a établi une classification des lignes en fonction des charges de trafic supportées par l'infrastructure ainsi que du type de trafic.

Le groupe UIC 1 correspond à des lignes très chargées et, à l'opposé, le groupe UIC 9 correspond à des lignes très faiblement chargées.

Ainsi que les grandes lignes du réseau ferré appartiennent en principe aux :

- Ligne de groupes (UIC 1, UIC 2, UIC 3 et UIC 4) ce sont des lignes à grande vitesse supportant un trafic important.
- Ligne de groupes (UIC 5 et UIC 6). ce sont des lignes à moyenne vitesse supportant un trafic moyen.
- Les lignes faiblement chargées des groupes (UIC 7, UIC 8 et UIC 9) correspondent en général au réseau capillaire, généralement régional, dont le trafic est faible.

6 Application

On va construire une nouvelle ligne de chemins de fer sur un sol comportant de 5% à 15% de fin,

La classe de portance de la plateforme est de moyenne qualité en déblai et de bonne qualité en remblai, la ligne est de groupe UIC4 avec voyageur, les traverses ont une longueur de 2,24 m le dimensionnement est normal dans ce cas

La charge maximale d'essieu des véhicules est égale à 20 tonne

Calculer l'épaisseur de la couche d'assise

CHAPITRE IV : Maintenance de la voie

1 Généralité

les opérations de maintenance sont conduites en fonctioons des trois paramètres ci-après :

- la nature de trafic (charge par essieu, tonnage circulé, vitesse) ;
- la qualité géomètrique de la voie compatile avec le trafic ;
- le coût de maintenance nécessaire pour assurer cette qualité géomètrique.

Pour mettre en œuvre de façon rationnelle la politique de maintenance, il est néssaire:

- de bien comprendre les facteurs intervenant la dégradation de la voie ;
- de distingué les zones selon les frequences des interventions nécessaires sur nivellement, a cet égare, la SNCF a définit une notionde « **cofficient d'entretion d'assise** » ;
- de distinguer les zones selon la fréquence des interventions nécessaires sur le nivellement. A cet égard, la SNCF a défini une notion de "coefficient d'entretien d'assise" ;
- d'analyser les problèmes de plates-formes sous l'aspect géotechnique.

2 Facteurs déterminants

2.1 Les proprietes mécanique des couches d'assise

La qualité des couches d'assise influe sur la tenue du nivellement de la voie :

- par la qualité mécanique de chacune des couches. Identifiée, par des essais appropriés ; la qualité de sol QS_i et le ***degré de pollution des couches***
- par la plus ou moins grande compatibilité des couches entre elles :

Pour palier une insuffisance notoire de qualité des couches d'assise, il est possible soit :

- dans les cas graves, de substituer totalement ces couches
- plus généralement, d'estimer la portance du système "plate-forme et couche intermédiaire" (assimilée à une sous-couche), et d'améliorer les couches d'assise conformément aux règle de dimensionnement .
- Bien entendu, il faut faire en sorte que, lors d'un ***renouvellement de ballast***, la couche éventuelle interposée entre ballast et plate-forme soit maintenue dans son intégralité et non dangereusement amincie (amoindrie), voire même supprimée.

2.2 Le fonctionnement hydraulique des couches d'assise

Pour assurer un bon fonctionnement hydraulique des couches d'assise:

- le ballast doit repose sur une "sous-couche" correctement pentée transversalement vers des dispositifs de collecte longitudinaux (cas de déblai) ou vers l'extérieur (cas de remblai). Cela se trouve compromis[1] lorsqu'il y a pollution du ballast (soit par attrition[2] de celui-ci, soit par apport de pollution extérieure, soit par remontée des fines de la plate-forme), lorsqu'il y a déformation de l'assise , ou lorsque le pentage transversal initial était mauvais et non dirigé vers un organe de collecte ;
- la sous-couche est suffisamment dense pour diminuer l'infiltration de l'eau dans la plate-forme ;
- la sous-couche a la possibilité elle-même de s'essorer transversalement vers les dispositifs de collecte ou vers l'extérieur. Cela se trouve compromis lorsque la sous-couche elle-même est polluée outre mesure(Avec excès) et déformée transversalement.

2.3 Les effets du gel

Lorsque le ballast ou la sous-couche deviennent sensibles au gel, ou lorsque le front de gel pénètre dans une plate-forme en sol sensible, des désordres de nivellement inacceptables peuvent se produire (soulèvement en période de gel et chute de portance lors du dégel) .

2.4 La fatigue de la plate-forme

La sollicitation à la fatigue d'un sol de plate-forme dépend :

- des caractéristiques du trafic,
- des caractéristiques du châssis de voie ,
- de l'épaisseur et des caractéristiques des couches d'assise,
- des caractéristiques de la plate-forme.

2.5 Influence de la rigidité sur la maintenance

La caractéristique principale pour la bonne tenue de la voie est la rigidité de l'ensemble "sous-couche + plate-forme" qui dépend de sa portance .

La réalisation de couches d'assise conformément aux recommandations d'une épaisseur minimum est une optimisation.

- Une portance, une rigidité, de l'ensemble "sous-couche + plate-forme" trop faible se traduit par une augmentation des travaux d'entretien et de maintenance du ballast

[1] Condition n'est pas satisfaisante
[2] Usure provoquée par le frottement

et du nivellement.

- Une rigidité trop forte (par exemple par traitement au ciment) peut provoquer pour des charges d'essieu et pour des vitesses élevées une destruction plus rapide du ballast et la réduction du confort.

3 Les opérations localisées pour la maintenance de la structures d'assises

3.1 Amélioration de la portance

Les divers procédés d'amélioration de la portance de la strucute d'assise sont :.

3.1.1 Renforcement de sous-couche lors du renouvellement

Le renouvellement de la voie s'opère comme suit :

- dégarnissage[3] avec pentage transversal vers l'extérieur ou vers les dispositifs de drainage longitudinaux ;
- mise en oeuvre d'une couche de grave d'au moins 15 cm d'épaisseur, elle-même pentée transversalement ;
- reballastage en cherchant à relever la voie de façon à limiter le plus possible la profondeur de dégarnissage.

Ces mesures, pour être durables, doivent s'accompagner d'une mise en état ou de la création s'il y a lieu, de dispositifs longitudinaux de drainage et de transit

3.1.2 Substitution complète des couches d'assise

Diverses techniques sont utilisées :

- **Mise en oeuvre d'une sous-couche classique en granulats**

Il n'y a pas de différence de principe avec les lignes nouvelles. Cependant, les possibilités réelles d'excavation peuvent nécessiter une minimisation des épaisseurs. A cet égard, les épaisseurs "ballast + sous-couche" peuvent être réduites dans une certaine mesure.

- **Imperméabilisation par géomembrane ou couche bitumineuse étanche**

Ce procédé ne peut être utilisé que lorsque les conditions hydrogéologiques et hydrologiques sont bonnes[4] . Il permet une réduction d'épaisseur des couches d'assise . Cette épaisseur peut être établie par assimilation aux épaisseurs calculées par La formule de calcul de l'épaisseur minimal de la couche d'assise, cependant, on considère qu'après

[3] Retire le ballast.

[4] -la couche supérieure du sol considéré est hors de toute nappe naturelle (niveau de cette dernière mesuré avant toute opération de rabattement complémentaire et en période climatique défavorable),

- la plate-forme n'est pas le siège de percolations naturelles nocives transversales, longitudinales ou verticales,
- les eaux de pluie sont évacuées correctement de la plate-forme et les dispositifs longitudinaux ou transversaux de drainage sont en bon état de fonctionnement.

imperméabilisation, une plate-forme de classe initiale de portance P1 devient une plate-forme de classe P2.

L'expérience a montré qu'il est nécessaire de disposer sous la géomembrane ou la couche bitumineuse une couche en matériaux drainants.

- **Emploi de m atériaux traités**

Différentes méthodes sont uti lisées :

- **Utilisation de grave-ciment** : mais ils, sur voies fortement chargées, se sont révélés peu concluants : des fissures sont apparues dans la grave-ciment accompagnées d'un phénomène de pompage.
- **Utilisation de sable chaulé (Lavé) :**Il est nécessaire d'interposer entre la couche traitée et le ballast, un matelas de grave non traitée. Cette couche de grave non traitée protège le sable chaulé vis-à-vis de l'agression du ballast et aussi des eaux d'infiltration. De plus, elle doit conférer à la structure d'assise une épaisseur suffisante eu égard à la tenue du sol sous-jacent.
- **Amélioration des plates-formes par traitement aux liants hydrauliques :** utilisent également des couches de sol traitées en place à la chaux avec apport d'une couche de grave sus-jacente(placé au-dessus) d'au moins 15 cm d'épaisseur.
- **Renforcement des plates-formes en sols organiques :**le traitement classique de ces plates-formes s'opère au cours de l'entretien courant en compensant les tassements permanents par des relevages de voie correspondants.

Le rechargement doit également être exécuté de part et d'autre de la voie (y compris éventuellement l'aménagement de banquettes de pied de talus) de façon à éviter un tassement ultérieur dissymétrique générateur de gauche. Afin de réduire les tassements et les vibrations élastiques il peut être recommandé d'utiliser un matériau compacté de faible densité.

3.2 Drainage

La conception des dispositifs d'assainissement disposés de part et d'autre de la voie est :

3.2.1 Drainages longitudinaux des plates-formes

- **Eaux souterraines**

Les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales sont déterminées par le niveau de la nappe phréatique . De mauvaises conditions hydrogéologiques et hydrologiques peuvent avoir des influences néfastes sur la portance de la plateforme et la tenue de la voie, on y remédie par rabattement de la nappe par des fossés ou des drainages profonds. Selon la situation locale, des réseaux prescrivent des valeurs limites variant de 0,8 à 2,5 m sous le plan de roulement. La valeur de 0,8 m n'étant acceptée que pour des plates-formes

de bonne qualité (P3) hors gel et lorsque la nappe a un très faible écoulement.

- **Eaux de surface**

Il est important d'évacuer au plus vite les eaux zénithales susceptibles d'arriver sur la plate-forme. Pour cela, il est nécessaire :

1) de penter correctement, dans le sens transversal , les platesformes vers les dispositifs longitudinaux de drainage (dans les déblais) ou vers l'extérieur (dans les remblais) tant en alignement qu'en courbe. La pente transversale doit être comprise entre 3 et 5 %.

Cependant dans certaines parties en dévers, on peut être amené à concevoir des plates-formes de double voie à pente unique transversale.

Le dessus de sous-couche doit être également penté. En effet, sous réserve que la sous-couche soit bien graduée, 80 % environ (coefficient de ruissellement c = 0,8) de l'eau zénithale s'écoulent directement de l'interface "ballast/sous-couche" vers les drainages. Les 20 % restants s'infiltrent dans la sous-couche, le pentage permettant l'essorage rapide.

2) de dimensionner correctement les dispositifs de drainage longitudinaux.

Ceux-ci doivent évacuer les débits apportés lors des orages importants (par exemple orages décennaux) :

- par l'ensemble "talus de déblai et voie ferrée" (débit Q_p), d'une part.
- par l'ensemble des éventuels bassins versants affluents de la tranchée (débit Q_v), d'autre part.

Bien souvent, les temps de concentration relatifs à chacun des débits Q_p et Qv sont très différents ;

Il faut ajouter, le cas échéant, les débits en provenance des rabattements de nappe.

3.3 Mise hors gel

On énumère ci-après, en les commentant, divers procédés de mise hors gel.

- **Epuration du ballast :**L'épuration du ballast pollué suffit dans les cas où les couches sous-jacentes ne sont pas incriminées.
- **Remplacement de la sous-couche :** Si la couche intermédiaire entre la plate-forme et le ballast (soit couche constituée d'un mélange ancien de ba llast, de matériaux divers et de sol, soit véritable sous-couche) est sensible au gel ou d'épaisseur insuffisante, on excave et on substitue par un granulat insensible. La profondeur de cette substitution. **Relèvement de la voie :** Cette possibilité de relever la voie est cependant limitée (déclivités, ponts, tunnels et caténaires) .

4 Contrôle de la végétation dans les plates-formes ferroviaires

Pour des raisons de sécurité de service et de coût d'entretien , le développement de la végétation doit être contrôlé à interval les réguliers, du moins sur les lignes à fort trafic. Le drainage correct des couches d'assise et de la couche de forme est un bon moyen pour les protéger du développement de la végétation .

Les herbicides sont à utiliser en dosage minimal , les conditions météorologiques doivent être appropriées (dans la mesure du possible : travaux de jour, absence de vent et de pluie) . Des contraintes supplémentaires peuvent réglementer l'utilisation d'herbicides en zone d'aménagement spécial ou de protection de nappe .

Lorsque, par des soins appropriés (coupe régulière par exemple) la végétation est limitée au seul gazon sur une bande d'environ 3 m de part et d'autre des voies le développement de la végétation vers les voies est réduit. On peut également empêcher la formation de végétation en réduisant à proximité des voies l'offre en substances nutritives.

Le développement de la végétation dans la voie peut être réduit par la mise en oeuvre d'une couche d'asphalte sous le ballast et sur les pistes et les accotements.

5 Exemple de méthodologie des études de maintenance des couches d'assise par la SNCF

5.1 Notion de "coefficient d'entretien d'assise" k

Entre deux renouvellements successifs, le coût des travaux d'entretien du nivellement n'est pas constant mais varie de façon monotone croissante. Ce coût peut dépendre considérablement de la qualité de la fondation (couches d'assise et plate-forme) de la voie : ce phénomène bien connu est mis en évidence par les différences constatées quant aux nombres des opérations d'entretien du nivellement sur des tronçons de même âge, de même type de superstructure supportant des trafics équivalents.

Pour une catégorie de trafic donnée et sur un réseau donné, il est possible d'évaluer statistiquement le nombre moyen annuel (***l_m***) d'interventions sur le nivellement en fonction de l'âge (***N***) de la voie.

On o btient ainsi (figure ci-dessous), une courbe d'évolution moyenne :

$$l_m = f(N)$$

Sur un tronçon particulier de voie, le nombre d'interventions (***l***) pour un âge donné (N) peut différer de la valeur moyenne (***l_m***)· Il est commode à cet égard (figure ci-dessous) de définir un facteur k appelé coefficient d'entretien d'assise et tel que :

$$k = \frac{l}{l_m}$$

Ce coefficient vaut par définition ***I*** dans le cas moyen, mais peut atteindre une valeur de ***10*** (et même plus) dans le cas d'une fondation très mauvaise .

A noter que lorsque ***I*** dépasse un certain seuills I_s. la qualité géométrique de la voie ne peut plus être en toute rigueur assurée pour des raisons diverses (impossibilité d'intervenir en période de chaleur sur zones en longs rails soudés par exemple); il y a alors nécessité d'effectuer certains travaux autres que les seules interventions sur le nivellement, de façon à tenter de réduire la valeur de ***k***.

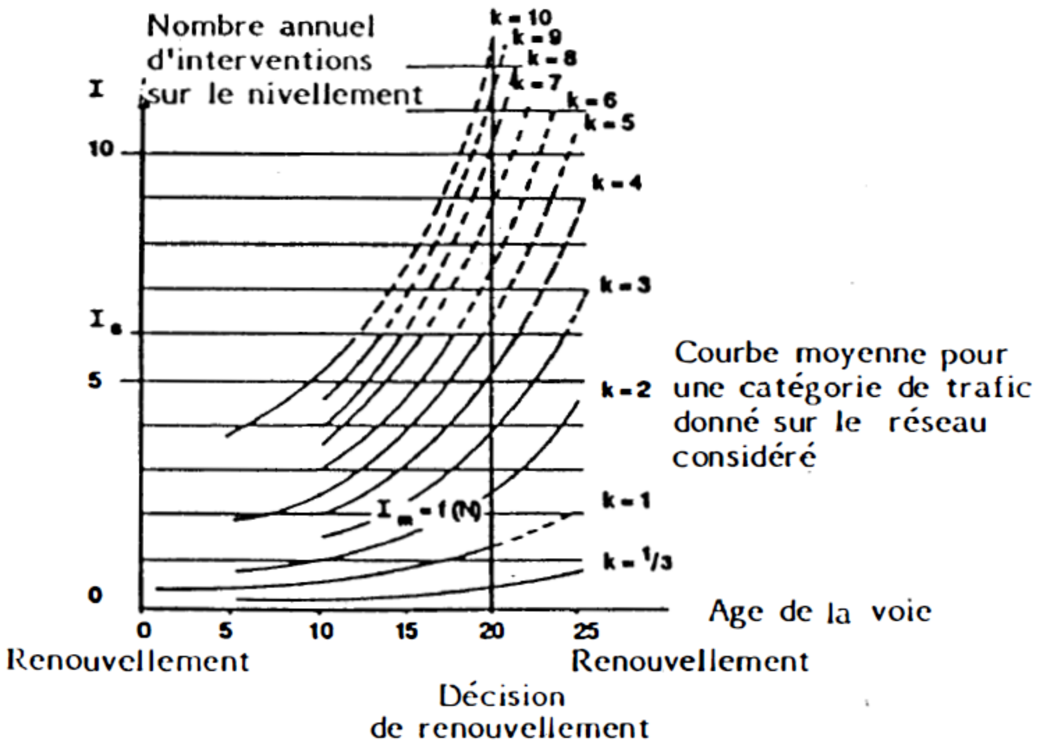


Figure 1 : Lignes à renouvellement systématique :
Evolution du nombre annuel d'interventions sur le nivellement
(Exemple relatif aux lignes des Groupes UIC 1 à 3 définis dans la fiche n° 714)

5.2 Augme ntation d'épaisseur des couches d'assise nécessai re en fonction de la vale ur du "coefficient d'entret ien d'assise" k

Lorsque l'épaisseur "ballast + sous-couche" est faible, on constate

(voir figure suivante) une relation entre l'épaisseur "ballast + sous-couche" et "le coefficient d'entretien d'assise" *k*. Ceci est observé même lorsque les règles d'anticontamination et de bon fonctionnement hydraulique sont assurées.

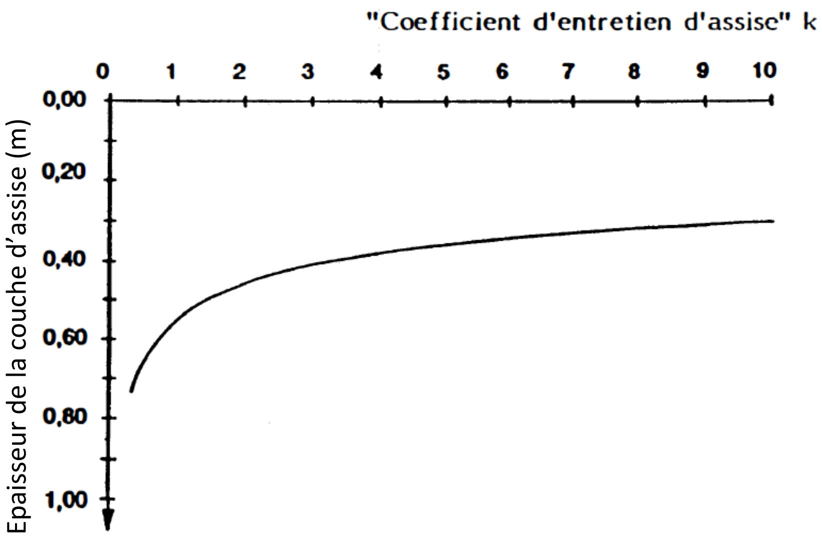


Figure 2 : Variation de l'épaisseur de couche d'assise en fonction du "coefficient d'entretien d'assise" k

Les courbes représentatives dépendent du trafic des lignes (selon classement de la fiche UIC n° 714) de la charge nominale maximale d'essieu des véhicules remorqués et des caractéristiques des plates- formes.

Il est possible de réduire la valeur de k en augmentant l'épaisseur des couches d'assise (en relevant la voie par exemple) comme indiqué, à titre d'exe mple sur la figure suivant.

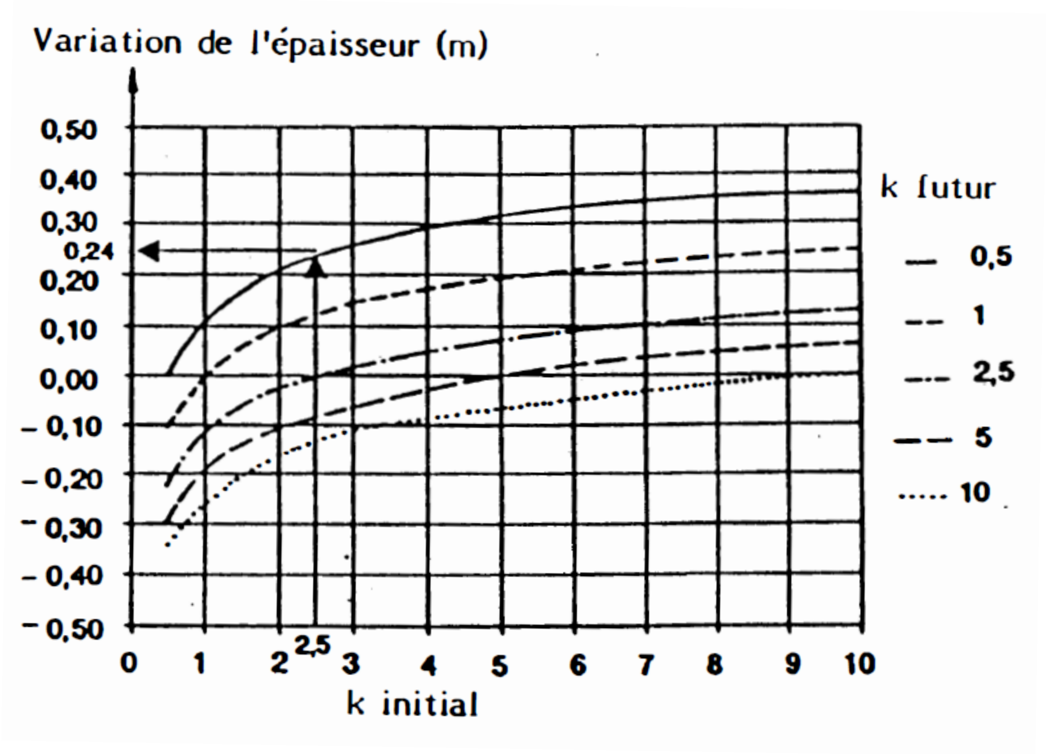


Figure 3 : Influence d'une modification d'épaisseur des couches d'assise

5.3 Méthodologie des études de maintenance des couches d'assise sur les lignes importantes (Lignes à renouvellement systématique)

Par un relevé minutieux des interventions de nivellement, on peut connaître à tout moment, la valeur du "coefficient d'entretien d'assise" *k* d'une voie donnée.

Cette valeur est déterminante, ainsi que les observations faites d'autre part lors des tournées, (plages boueuses, fonctionnement des dispositifs de drainage et de collecte) pour ce qui concerne les dispositions à prendre :

- en entretien courant,
- en opérations localisées éventuelles,
- en renouvellement.

Valeurs de k	Actions
k < 1 (couches d'assise correctes)	**Entretien courant :** • Pas de dispositions particulières; l'entretien doit pouvoir s'effectuer par bourrage mécanique lourd. Il convient cependant de surveiller et entretenir les dispositifs de drainage et de collecte.
	Renouvellement : • Eviter dedégarnir profondément (ne pas dégarnir à une profondeur supérieure à l'épaisseur de ballast existante) . • Penter correctement le fond dedégam issage. • Apporter une couche de ballast sain d'épaisseur suffisante en fonction de l'armement et du trafic futurs.
1 < k < 2,5 **(**couches d'assise légèrement sous-dimensionnées)	**Entretien cou rant :** • Dans la mesure du possible, effectuer par apport de ballast, des relevages successifs pour ramener le "coefficient d'entretien d'assise" k à une valeur inférieure à 1
	Renouvellement : • Toutes les dispositions prévues ci-dessus pour un coefficient k < 1 restent valables ; il convient cependant de s'attacher plus particulièrement ici à vérifier la bonne qualité des sous-couches. Le renforcement pour obtenir un coefficient d'entretien d'assise k futur inférieur à 1 est indispensable.

<table>
<tr><th>Valeurs de k</th><th>Actions</th></tr>
<tr><td rowspan="2">2,5 < k < 5
(Couches d'assises sous-dimensionnées et présomption de mauvaise qualité de la sous-couche et du mauvais fonctionnement hydraulique)</td><td>Entretien courant :
• La situation 2,5 < k < 5 ne peut être prolongée sans compromettre de façon irréprochable la qualité des couches d'assise.
• Il y a lieu , par sondages (d'examiner le fonctionnement et la qualité des couches d'assise. Selon les résultats de ces investigations on peut être amené à :
o effectuer un relevage pour obtenir un coefficient d'entretien d'assise k futur acceptable
o créer ou améliorer le système de drainage et de collecte des eaux
o refaire de nouvelles structures d'assise bien drainées</td></tr>
<tr><td>Renouvellement :
• Dans les zones où, par entretien courant, on a pu amener le coefficient d'entretien d'assise k à une valeur de l'ordre de 1, il y a lieu lors du renouvellement, d'adopter les dispositions indiquées ci-dessus pour k < 1.
• Par contre, dans les zones où le coefficient d'entretien d'assise k n'a pu être diminué, il y a lieu d'envisager, avant renouvellement, une réfection des structures d'assise.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">k > 5
(Couches d'assise sous-dimensionnées, mauvaise qualité ou inexistence de la sous-couche et mauvais fonctionne ment hydraulique)</td><td>Entretien courant :
• Dès que, sur une évolution de plusieurs années et malgré les tentatives d'amélioration, une telle valeur de k se confirme, il y a lieu, après sondages, d'envisager la réfection des structures d'assise.</td></tr>
<tr><td>Renouvellement :
• La réfection des structures d'assise préalable s'impose.</td></tr>
</table>